

## Geotail の成果に刺激された理論・シミュレーション研究

Geotail の観測は磁気圏物理における問題意識を大きく変えた。プラズマ・ダイナミクスの本質的理解のためには流体的描像だけに留まっていたはず、粒子的描像までに踏み込まなければいけない。これを教条主義的に述べるのではなく、Geotail においては高感度粒子観測器データを実際に出版してみせることで、世界の研究者を納得させたのである。このことは理論研究を行っていた研究者の研究態度にも波及し、観測実証と連携して理論・シミュレーション研究を進めていくこと、逆に、新しい理論から予測された現象を実際の宇宙空間において観測実証することが、磁気圏科学分野の「文化」として定着した。さらに、真に優れた観測機器での「その場」観測は宇宙プラズマ物理に新しい地平を開くこと、「その場」観測による詳細な情報なしには宇宙プラズマ・ダイナミクスの根源的な理解は得られないことが確信され、今後は磁気圏という枠組みに留まるのではなく、普遍性を意識した研究を促進することが研究分野の新しい使命であると認識されている。

### 電子・陽電子ペアプラズマ中での磁気リコネクション

#### “宇宙における相対論的電子生成に磁気リコネクションは関与するか？”

最近、パルサーや活動銀河核といった高エネルギー天体領域でも磁気リコネクションの役割が議論されるようになってきた。このような領域では、電子・陽電子の相対論プラズマの中で磁気リコネクションが起こっていると考えられているが、その性質はほとんどわかっていなかった。そこで、Geotail の詳細なリコネクションの議論を出発点に、電子・陽電子リコネクションの性質を解明する理論研究が行われた。電子・陽電子リコネクションの 2 次元計算機実験からは、系の典型速度が光速に近づくと、相対論慣性効果によって非常に強い粒子加速を生じることが発見された。一方、リコネクションと垂

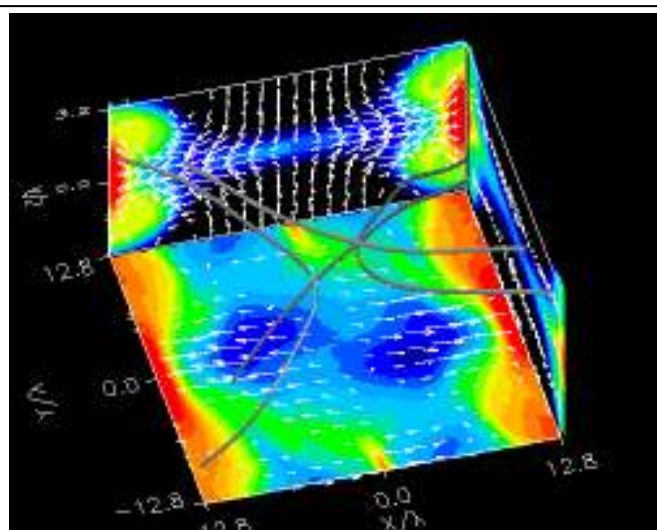


図 2.10-1 ペアプラズマ中の 3 次元リコネクション

直方向の 2 次元平面でも、相対論的ドリフトキンク不安定という電流駆動型不安定が発生し、磁場エネルギーを散逸することがわかった。3 次元系では、相対論的ドリフトキンク不安定が卓越するため、リコネクションは成長しない。しかし磁場が捩じれている（ガイド磁場成分が存在する）場合には、相対論的ドリフトキンク・テアリングモードという斜め不安定モードが相互干渉し、リコ

ネクションが励起されることも明らかになった。こうした電子・陽電子プラズマ内部の素過程の研究は、天体プラズマでの磁場散逸やエネルギー変換を議論するための基礎になるものであり、今後もさらなる解明が望まれている (Zenitani and Hoshino, 2001, 2005)。

#### 超高マッハ数のショック物理

##### “宇宙空間を満たす非熱的電子をショックは如何に生成するか？”

天体の様々なダイナミクスを知る唯一の手がかりは、天体からの放射であるといつてよい。この放射を担うものに高エネルギー電子があり、その生成現場候補として、宇宙に普遍的に存在するプラズマ衝撃波が広く受け入れられてから久しい。Geotail による詳細な衝撃波プラズマ粒子波動計測の結果、従来の衝撃波フェルミ加速だけでは電子加速現象を根元から説明できないことが確認され、電子初期加速現場が上流から下流へと変化する場所である「衝撃波遷移層」であること、衝撃波遷移層中には電子スケールのコヒーレントな電場構造があることなどが発見された。伝統的な電子の振る舞いの理解は、マクロな輸送係数に押し込められるか、テスト粒子的に取り扱われることが殆どであり、プラズマ衝撃波における電子ダイナミクスについての理解は乏しかった。そこで、今までミッシングリンクだった「バックグラウンド電子（熱的電子）の高エネルギー化過程」のシミュレーション研究が始まり、プラズマ・ダイナミクスとしての衝撃波理解

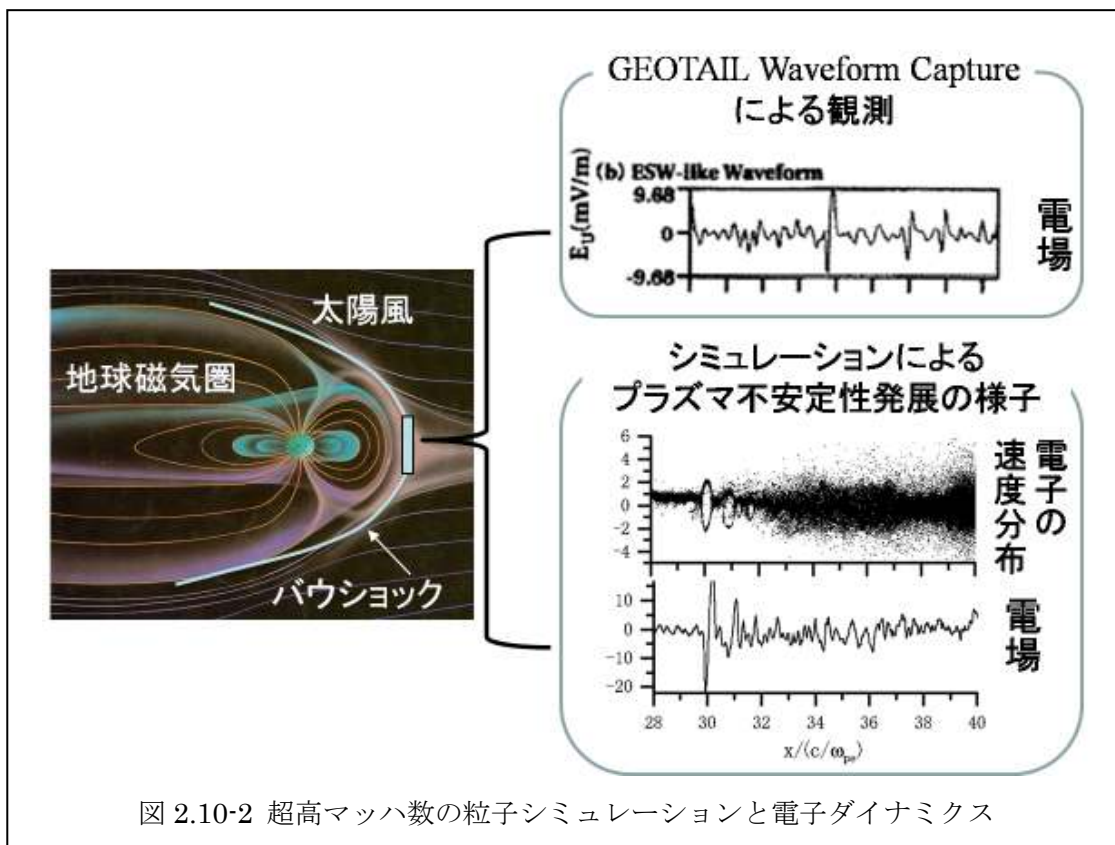


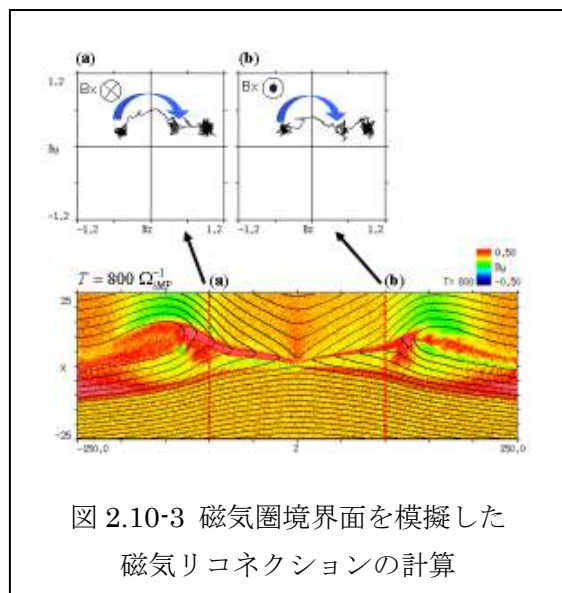
図 2.10-2 超高マッハ数の粒子シミュレーションと電子ダイナミクス

が次第に重要視されてきている。衝撃波遷移層中における電子加速過程は一般に、動的かつ自己組織的なものであり、また強い非線形性を示す。衝撃波フェルミ加速で考えられていた静的衝撃波面といった捉え方とは異なるこれらのアプローチによって、現在、太陽系内衝撃波にとどまらず、超新星爆発、銀河ジェットなどに伴う衝撃波のダイナミクスをも本質から理解しようとする研究が発展中であり、今後衝撃波加速機構の新たなパラダイムが開けていくと期待できる (Shimada and Hoshino, 2000, 2005)。

#### 磁気圏境界での磁気リコネクションに関するシミュレーション研究

**“磁気圏境界で提供される様々な境界条件の下、磁気リコネクションはどう発展するか？”**

磁気圏境界では太陽風中の惑星間空間磁場と地球磁場との間で磁気リコネクション



が起こる。その結果生じるプラズマ輸送は磁気圏活動を駆動する基本メカニズムであるが、その視点とは別に、磁気圏境界では太陽風側に様々な境界条件が実現され得るという、リコネクションの物理からの興味も高い。さまざまな状況における磁気リコネクションを、イオンを粒子、電子を流体として扱う2次元粒子流体混成(ハイブリッド)法を用いた計算機シミュレーションで調べた。その結果、磁気圏境界横断時に見られる磁場回転特性が説明されるなどの成果が得られている (Nakamura and Scholer, 2000)。

#### ケルビン・ヘルムホルツ渦の数値実験

**“渦が巻き上がると、ほんとうに面白いことが起きるのか？”**

Geotailにより、地球磁気圏尾部側の低緯度境界近傍において、太陽風起源のプラズマが磁気圏プラズマと混合している領域や直接磁気圏内部に流入している領域が発見された。これらの発見は、昼側境界で起こる磁気リコネクションによる流入以外にも、尾部側の境界を通して太陽風プラズマが磁気圏内部へ流入していることを決定付けるものであった。尾部領域における太陽風流入の主な原因として、太陽風プラズマと磁気圏プラズマの速度差により生じるケルビン・ヘルムホルツ (KH) の渦が挙げられているが、複雑な渦の構造を観測結果だけで理解することは難しく数値計算による助けが必要となる。ここで考える渦の全体サイズは巨大なため小スケール効果を無視した



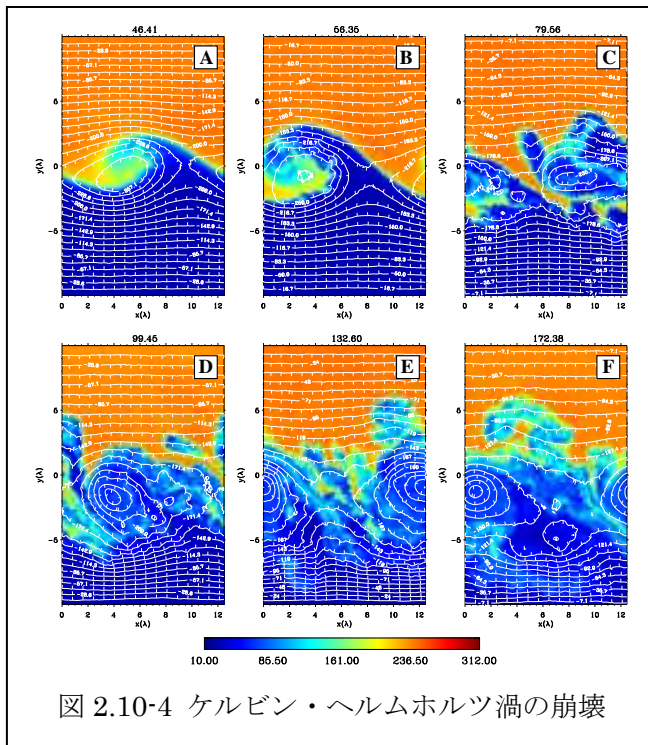


図 2.10-4 ケルビン・ヘルムホルツ渦の崩壊

MHD シミュレーションが多く行われてきたが、MHD 近似を用いると磁場の凍結という理論的制約から磁力線をまたいだ輸送や混合が起こりえない。そこで近年、電子スケールの効果を含み磁場の凍結を自然に破ることのできる 2 流体近似や粒子モデルを用いた研究が行われ、渦の内部で局所的に電子効果が働きプラズマの混合や輸送が促されるという画期的な結果が示された。このように、数値計算技術の発達に伴い、Geotail の豊富なデータと数値計算を比較する研究も成果を挙げ始めており、磁気圏尾部の低緯度境界の物理が着実に解明さ

れつつある。さらに、どのような場面においても、プラズマ輸送というのは常に様々なスケールの物理が連携して発動する難問であるが、磁気圏境界での実証を伴った理論研究はこの難問の解決へと至る道を着実に進む効果的なステップである (Nakamura et al., 2004, 2006、Nakamura and Fujimoto, 2005、Matsumoto and Hoshino, 2006)。

#### 磁気リコネクション・トリガー問題

**“磁気リコネクション・トリガーをするために、電流層はどこまで薄くならねばならないのか？”**

磁気リコネクションは磁場エネルギーを爆発的に解放する重要な過程で、宇宙プラズマのダイナミクスを語る上でその理解は欠かせない。磁気リコネクションの物理のうち、特に難問はそのトリガー機構を理解することである。磁気リコネクションをトリガーするためには電流層を薄くする事が必要とされているが、電流層を如何に薄くし、そこまで薄くなればその中で何が生じるのかを理解する事は、未解決課題である。Geotail の観測は、磁気圏尾部電流層中でプラズマ粒子がダイナミックに振舞う様相を垣間見せ、また、それまで有力であった「低域混成ドリフト不安定性による異常電気抵抗モデル」の破綻を示した。これらに刺激された近年の 3 次元粒子計算 (Shinohara and Fujimoto, 2005、Tanaka et al., 2005) においては、低域混成ドリフト不安定性に新しい役割があることを示され、また、それをきっかけとして様々なモードの間の連携があり、結果として、イオンスケール程度に分厚い電流層においても爆発的な磁気リコネクションがトリガーされるという全く新しい物理過程の発見がなされた。

[参考文献]

- [06-18] Matsumoto and Hoshino (2006), J. Geophys. Res.  
[06-24] Nakamura et al. (2006), Geophys. Res. Lett.  
[04-36] Nakamura et al. (2004), Phys. Rev. Lett.  
[05-58] Nakamura and Fujimoto (2005), COSPAR Colloq. Ser.  
[00-48] Nakamura and Scholer (2000), J. Geophys. Res.  
[05-75] Shimada and Hoshino (2005), J. Geophys. Res.  
[00-70] Shimada and Hoshino (2000), Astrophys. J. Lett.  
[05-78] Shinohara and Fujimoto, COSPAR Colloq. Ser.  
[05-94] Tanaka et al. (2005), Geophys. Res. Lett.  
[05-104] Zenitani and Hoshino (2005), Phys. Rev. Lett.  
[01-73] Zenitani and Hoshino (2001), Astrophys. J. Lett.

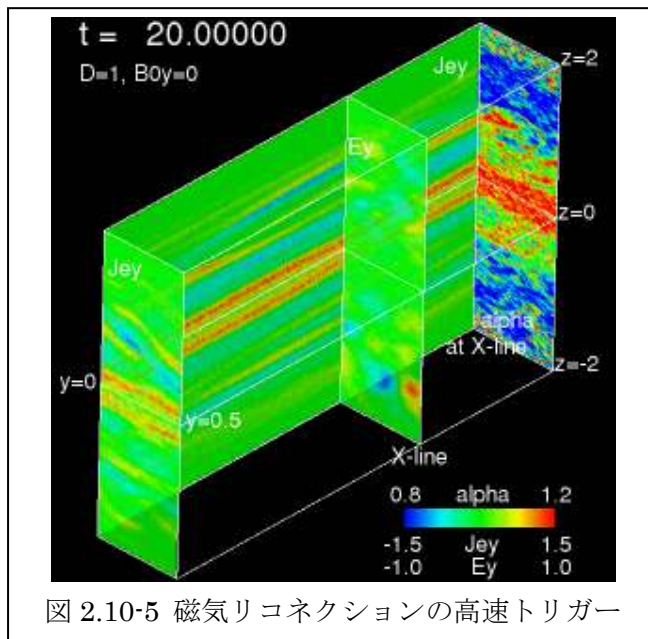


図 2.10-5 磁気リコネクションの高速トリガー